

## Stand der Technik und ausgeführte Projekte

Philipp Guirguis, Hans Peyer\*

# Stahlfaserbeton-Tübbinge

Stahlfaserbeton findet im Tunnelbau ein weites Einsatzfeld. Der Beitrag gibt den derzeitigen Stand der Technik bei der Verwendung von Stahlfaserbeton für Tübbinge wieder und stellt einige Einsatzbeispiele vor.

Im Tunnelbau findet Stahlfaserbeton ein hervorragendes Einsatzgebiet. Die häufig vorhandene Schnittgrössenkombination aus hohen Drucknormalkräften und relativ geringen Biegemomenten einer Tunnelschale lässt sich vorwiegend mit den Materialeigenschaften von Stahlfaserbeton alleine bewältigen. Der Materialwiderstand gegen konzentrierte Lasteinleitungen sorgt für einen deutlich geringen Wartungsaufwand. Der Einsatz dieses Werkstoffes führt zu ausführungstechnischen Vorzügen und zur Beschleunigung des Bauablaufs. Die Bereitschaft für den Einsatz von Stahlfaserbeton im Tunnelbau steigt mit der Flexibilität, die die Verwendung des Baustoffes ermöglicht und den Kosten, die gegenüber einer herkömmlichen Konstruktionslösung aus Stahlbeton eingespart werden.

### Vorteile und Materialeigenschaften Stahlfaserbeton

Stahlfasern werden dem Beton zugemischt, um neben einer Traglasterrhöhung, die mechanischen Eigenschaften auf bestimmten Gebieten zu verbes-

sern. Zu den massgebenden Eigenschaften, die durch die Zugabe von Stahldrahtfasern deutlich verbessert werden, zählen:

- Duktilitätssteigerung unter Zug und Druck,
- erhöhte Schlagzähigkeit,
- verbessertes Ermüdungsverhalten,
- geringere Abplatzungen,
- erhöhte Dauerhaftigkeit,
- geringere Rissbreiten im Gebrauchszustand,
- Biegetragfähigkeit in allen drei Raumrichtungen.

Der Ersatz herkömmlicher Bewehrung durch Stahlfasern bietet Kosteneinsparungspotentiale bei den Bewehrungsarbeiten (Produktion, Lagerung, Einbau der Bewehrungskörbe) und erhöht die Flexibilität, zum Beispiel bei Planungsänderungen.

### Einsatzbereiche von Stahlfaserbeton im Tunnelbau

Die Einsatzmöglichkeiten von Stahlfaserbeton im Tunnelbau sind vielfältig. Hieraus resultiert auch die Vielzahl existierender Anwendungsvarianten. Zu-

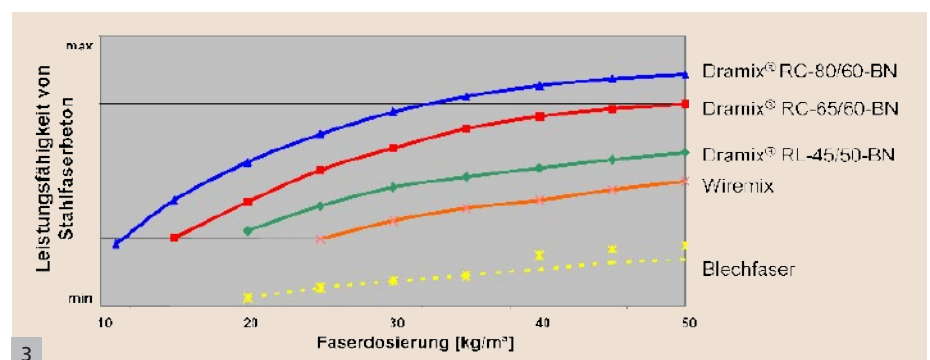
nächst gilt die Betrachtungsweise des angewandten Tunnelbauverfahrens, indem zwischen der Spritzbetonbauweise und dem maschinellen Tunnelbau unterschieden wird. Ferner ist eine Gliederung der verwendeten Konstruktion möglich, durch Differenzierung zwischen der einschaligen und zweischaligen Bauweise. Stahlfaserbeton findet in allen vorgenannten Varianten seinen Einsatz.

Beim Einsatz von Stahlfaserspritzbeton werden die Stahlfasern der Ausgangsmischung des Spritzbetons beigemischt. Im Spritzbetonverfahren dominiert der entscheidende Vorteil des Verzichtes auf den Arbeitsschritt «Einbau der Bewehrung». Nicht nur die Bauzeit wird verkürzt, sondern auch die frühzeitige Aktivierung der Felssicherung, besonders wichtig unter geologisch schwierigen Bedingungen, wird sichergestellt. Durch das schnelle Auffahren der Erstsicherung und der hohen Grünstandfestigkeit des Stahlfaserspritzbetons werden Gebirgsauflockerungen vermindert, damit einhergehend der Gebirgsdruck reduziert und ein bedeutend günstigerer Spannungszustand erzielt.

Im maschinellen Tunnelbau werden in der Regel Tübbinge eingesetzt, die im Elementwerk gefertigt und an den Einbauort transportiert werden. Belastungszustände infolge Ausschalen (Bild 1), Lagerung und Transport lassen sich mit dem Werkstoff Stahlfaserbeton in der Regel ohne weitere Zusatzbewehrung bemessen. Die Biegespannungen sind in der Regel gering. Der Vorteil, der sich bereits hier bei der Verwendung von Stahlfaserbeton ergibt, ist ersichtlich. Es entstehen keine Kosten infolge Vorhalten und Lagerung der Bewehrungskörbe, Bewehrungsarbeiten entfallen und der Ausführungsprozess wird optimiert (Bild 2).

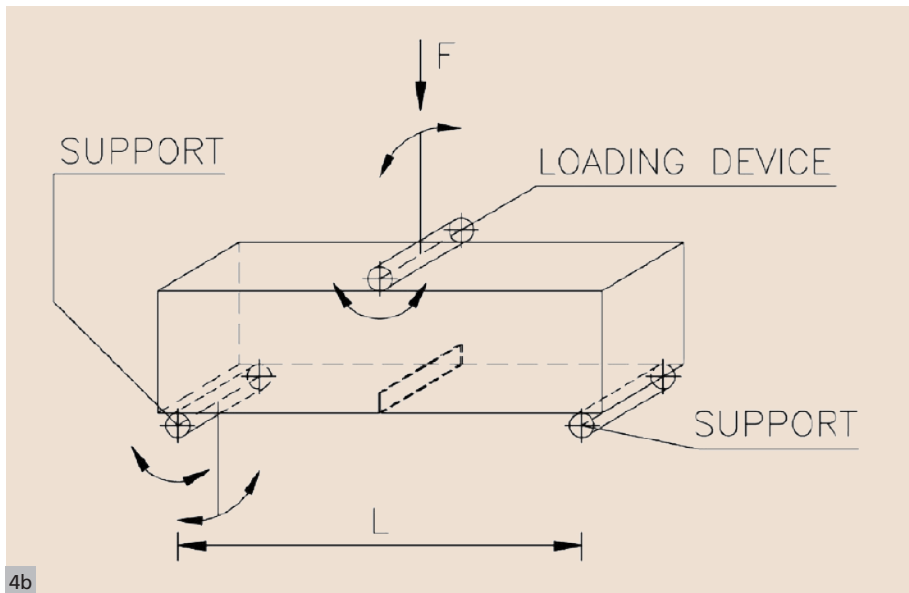
Fugen stellen ganz besonders kritische Bereiche dar. Infolge Transports und während des Einbaus treten häufig Abplatzungen auf, die bei Verwendung einer entsprechenden Betonstahlbewehrung, durch Einhaltung der Be-

- 1 Belastungszustand Ausschalen Tübingelement.
- 2 Einsatz und Positionierung Bewehrungskorb.
- 3 Verschiedene Stahlfasertypen und Leistungsfähigkeit.





4a



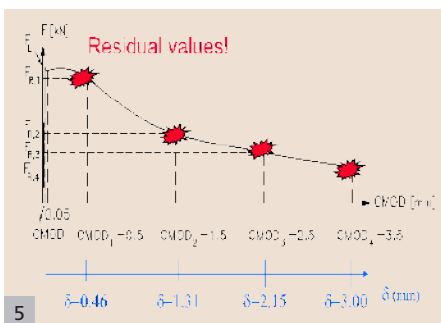
4b

4a Balkenprüfung: 4-Punkte-Biegeversuch; 4b: Prinzipdarstellung des 3-Punkt-Biege-Versuchs.

tondeckung, nicht verhindert werden. Führen Abplatzungen zu einer Wasserwegigkeit wird die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt. Der Vorteil von Stahlfaserbeton-Tübbinggen gegenüber konventionell bewehrtem Beton sind die mit Stahlfasern durchsetzten und vernadelten, sonst gefährdeten, Eck- und Kantenbereiche. Ist die Tragfähigkeit durch die Stahlfasern allein gesichert, kann komplett auf konventionelle Bewehrung verzichtet werden. Im Brandfall führen die Stahlfasern dazu, dass keine Oberflächenschichten abplatzen. Für erhöhte Anforderungen Brandschutz im einschaligen Ausbau,

5 Lastverformungskurve exemplarisch: Auswertung residualer Werte.

6 Belastungstest an einem Einzelsegment.



5



6

werden geeignete PP-Fasern zudosiert (Duomix M6).

### Wirkungsweise und Tragwirkung im Tübbing

Eine wesentliche Eigenschaft des Stahlfaserbetons ist sein duktileres Materialverhalten und seine Fähigkeit, im gerissenen Zustand eine Kraftübertragung über den Riss hinweg sicherzustellen. Von besonderer Bedeutung ist, dass Stahlfaserbeton mit üblichen Fasergehalten einer unterkritischen Bewehrung entspricht. Seine Anwendung findet er daher vorwiegend in Bauteilen, die eine Schnittkraftumlagerung und damit Mehrfachrissbildung zulassen (statisch unbestimmte Bauteile).

Tunnel sind in hohem Masse statisch unbestimmte Systeme. Die Belastungskombination aus Biegemoment und Drucknormalkraft ist für die Bemessung im Endzustand ausschlaggebend. Je steifer die Systeme, desto anziehender wirken sie auf Biegemomente. Je höher die auftretenden Momente, desto höher der erforderliche Bewehrungsgrad. Biegeeweiche Systeme hingegen tragen die Belastung vorwiegend durch Normalkräfte ab. Die Forderung nach biegeweichen Systemen im modernen Tunnelbau findet somit ihre Begründung. Im Gegensatz zu steifen Systemen erfolgt durch die Verformung der Schale eine verstärkte Aktivierung der Eigen-tragwirkung des Gebirges. Die von der Sicherung (Tübbingringe) aufzunehmenden Kräfte sind daher bei duktilen Systemen geringer. Die Materialeigenschaften des Stahlfaserbetons eignen sich auf zweifache Weise der geforderten Tragfähigkeit zu entsprechen:

### Erhöhung der Querschnittstragfähigkeit

Stahlfaserbeton ist in der Lage rechnerisch ansetzbare Kräfte im gerissenen

Zustand zu übertragen. Im Vergleich zu unbewehrtem Beton (rechnerischer Ansatz von Zugkräften nicht erlaubt) führt dies in biegebeanspruchten Bauteilen mit Normalkräften zu einer deutlichen Traglasterrhöhung. In vielen Fällen ist die Traglast hinreichend, um eine sonst erforderliche Bewehrung komplett zu substituieren.

### Erhöhung der Systemtragfähigkeit

Das duktile Materialverhalten ermöglicht nach Überschreitung der Erstrisslast eine Kraftübertragung in andere Querschnittsteile; die Schnittgrößen lagern sich um, und eine weitere Laststeigerung bis zum Erreichen der Systemtragfähigkeit wird ermöglicht. Eine plastische Schnittgrößenermittlung bildet das Tragvermögen des Stahlfaserbetons am sinnvollsten ab. Die anschließend ermittelten Schnittgrößen fallen geringer aus als bei einer rein elastischen Betrachtung. Zudem erhöht sich bei weicheren Systemen der Lastanteil der direkt vom Gebirge selbst abgetragen wird.

### Kriterien für die Leistungsfähigkeit eines Stahlfaserbetons

Beton wird anhand seiner Druckfestigkeit in Klassen eingeteilt. Dies ist bei Faserbeton nicht anders, denn auch hier gilt: Faser ist nicht gleich Faser! Stahldrahtfasern werden aus kaltgezogenen Drähten verschiedener Werkstoffgüten hergestellt. Die Zugfestigkeit liegt in der Regel zwischen 1000 N/mm<sup>2</sup> und 2500 N/mm<sup>2</sup>. Die Faserlängen variieren zwischen 30 mm und 60 mm und deren Durchmesser zwischen 0,40 und 1,10 mm. Die Leistungsfähigkeit von Stahldrahtfasern, damit einhergehend die des Stahlfaserbetons, ist im Wesentlichen abhängig von Faserdurchmesser, -länge, -verankerungsart, der Drahtzugfestigkeit und der Lieferform. Nachfolgend



aufgeführte Kriterien sichern einen leistungsstarken Stahlfaserbeton zu:

- Endhaken,
- möglichst dünn,
- möglichst lang,
- hohe Schlankheit,
- an die Betongüte angepasste Zugfestigkeit,
- optimierte Betonrezeptur.

Drei unterschiedliche Stahlfasertypen veranschaulichen beispielhaft die laufende Meterlänge und Stückzahl Fasern für 1 kg. Der Quotient  $l/d$  stellt das Längen/Durchmesser Verhältnis und somit eine Art Leistungsklasse dar (Bild 3).

RL-45/50-BN  $l/d = 45$ ,  $L = 147$  m/kg, 2950 Fasern/kg

RC-65/60-BN  $l/d = 65$ ,  $L = 200$  m/kg, 3330 Fasern/kg

RC-80/60-BN  $l/d = 80$ ,  $L = 288$  m/kg, 4800 Fasern/kg

Je höher die Stückzahl und je länger die Fasern, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass ein Riss auf eine Faser trifft! Das Verkleben zu Bündeln ermöglicht auch sehr leistungsfähige Fasern mit grossen Schlankheiten ( $l/d > 50$ ) gleichmässig im Beton zu verteilen. Entscheidend ist zudem, eine an die Betongüte angepasste Zugfestigkeit zu wählen, um die Duktilität des Stahlfaserbetons aufrecht zu erhalten. Normalfeste Stahldrahtfasern (1000 bis 1300 N/mm<sup>2</sup>) werden im Allgemeinen für Betone der Festigkeitsklasse bis C 50/60 verwendet. Für Festigkeiten darüber hinaus empfehlen sich mittel- bzw. hochfeste Stahldrahtfasern (1500 bis 2500 N/mm<sup>2</sup>).

## Prüfverfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit

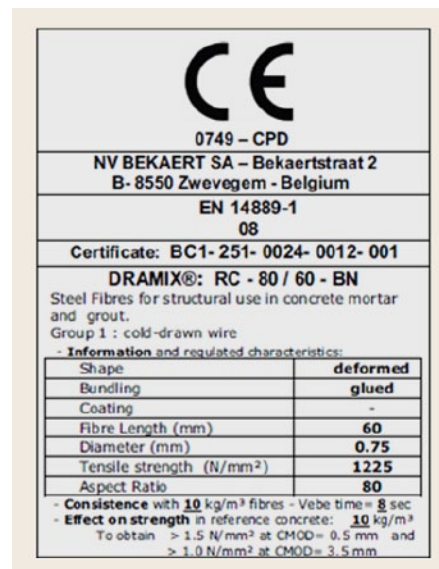
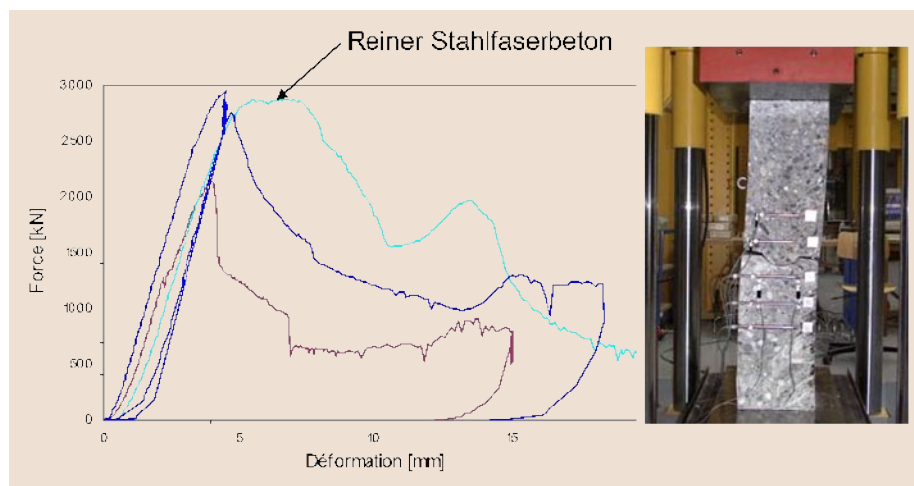
### Vorbemerkung

Probekörper werden generell mittels verformungsgesteuerten Verfahren unter Biegung getestet. Grundsätzlich lässt sich zwischen statisch bestimmten Balkentests und statisch unbestimmten Plattentests unterscheiden. Statisch bestimmte Balkentests dienen der Ermittlung von Materialeigenschaften. Die ermittelte Nachrissbiegezugfestig-

keit wird für eine Bemessung von Tübbingelementen als Kennwert auf der Materialwiderstandsseite genutzt. Die Grundlagen von Balkentests werden im nächsten Unterpunkt erörtert. Der wohl geläufigste Plattentest, der «EFNARC Panel», unterliegt einem Prüfverfahren zur Ermittlung der Systemtragfähigkeit. Die ringsum gelagerte Quadratplatte ist statisch unbestimmt und simuliert das Tragverhalten einer Spritzbetonschale. Die Systemtragfähigkeit wird als Energieabsorptionsvermögen ausgewertet und der Anforderung an die Spritzbetonschicht entgegengestellt. Da dieser Plattentest eine Systemtragfähigkeit ermittelt, kann das Ergebnis nicht für die Bemessung einzelner Elemente (zum Beispiel Tübbinge) herangezogen werden. Der Plattentest wird im Rahmen dieses Beitrags nicht weiter vertieft.

### Statisch bestimmte Biegebalkenprüfungen

Die Ermittlung der Materialeigenschaften zur Abbildung der Momententragfähigkeit erfolgt über verformungsgesteuerte Biegebalkenprüfungen. Mit dem Testverfahren statisch bestimmter Prüfbalken liegt ein geeignetes Verfahren vor, die Ergebnisse in eine Bemessung zu überführen (zum Beispiel für die Querschnittstragfähigkeit in den Bauzuständen oder für das M-N-Interaktionsdiagramm). Die Testmethode nach EN 14651 [4] sieht einen Drei-Punkt-Biegeversuch vor (Bild 4b). Die Auswertung der Lastverformungskurve erfolgt über residuelle Werte an definierten Durchbiegungspunkten. Das Testverfahren nach JSCE SF-4 [6] sieht einen Vier-Punkt-Biegeversuch vor (Bild 4a). Die Auswertung der Lastverformungskurve erfolgt über äquivalente Werte (Auswertung der Fläche unterhalb der Kurve). Das DBV-Merkblatt [3] sowie die DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [2] regeln ebenso einen Vier-Punkt-Biegeversuch. Unterschiede gibt es in der Auswertungsmethode. Im Allgemeinen werden zwei Verformungsbereiche ausgewertet. Die Leistungsfähigkeit unter geringer Balkendurchbiegung wird für



7 CE Label Stahldrahtfaser Dramix RC-80/60-BN.

Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit herangezogen. Die Leistungsfähigkeit unter grösserer Balkendurchbiegung wird für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit genutzt (Bild 5).

### Belastungstest an Grosselementen

Mit den zur Verfügung stehenden Berechnungsmodellen lassen sich insbesondere auf der Materialseite nicht immer die Widerstandsgrössen hinreichend ermitteln, speziell wenn es um Nachweise der aufnehmbaren Spalt- und Randzugkräfte geht. Eine Ermittlung der Grenztragkräfte des verwendeten Materials lässt sich daher sehr gut an experimentellen Untersuchungen ermitteln (Bild 6).

### Normierung von Stahlfasern

In Europa müssen Stahlfasern zur Verwendung in Beton mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet werden einschliesslich auf allen Verpackungen. Die Mindestanforderungen an Stahlfasern werden in der harmonisierten Norm DIN EN 14889-1 [5] beschrieben. Die Norm DIN EN 14889-1 [5] legt Anforderungen für Stahlfasern für Beton, Mörtel und Einspressmörtel für tragende und andere Zwecke fest. Es gibt zwei unterschiedliche Systeme der Konformitätsbescheinigung: System 1 – Stahlfasern für tragende Zwecke und System 3 – Stahlfasern für andere Zwecke. Die Norm DIN EN 14889-1 [5] definiert tragende Zwecke wie folgt: «Bei der Verwendung von Fasern für tragende Zwecke tragen die zugegebenen Fasern zur Tragfähigkeit eines Betonbauteils bei». Demnach ist für fast alle praktisch relevanten Fälle eine Konformitätsbescheinigung

8 Druckversuche an Ringfugen von Tübbingen (Projekt Oenzbergtunnel).

nach System «1» erforderlich. Um Verwechslungen vorzubeugen, sollten ausschliesslich nach System «1» überwachte und zertifizierte Stahlfasern mit zugehörigem EG-Konformitätszertifikat verwendet werden. In der Norm sind für die jeweils massgebenden Eigenschaften der Fasern zulässige Toleranzen festgelegt. Um dem Nutzer eine Idee über die Leistungsfähigkeit einzelner Fasertypen zu vermitteln, wird an einem Referenzbeton der Einfluss auf die Festigkeit von Beton getestet. Es ist die Mindestzugabemenge Stahlfasern definiert, die erforderlich ist, um in einem Prüfverfahren nach DIN EN 14651 [4] eine residuelle Biegezugfestigkeit von  $1,5 \text{ N/mm}^2$  bei einer Rissöffnungsbreite von  $0,5 \text{ mm}$  und von  $1,0 \text{ N/mm}^2$  bei einer Rissöffnungsbreite von  $3,5 \text{ mm}$  zu erreichen. Die Angabe der erforderlichen Menge zum Erreichen dieser Leistungsfähigkeit vermittelt einen Anhaltswert bezüglich der Leistungsfähigkeit des jeweiligen Fasertyps (Bild 7).

## Referenzprojekte

Zahlreiche Tunnelprojekte wurden weltweit in den letzten Jahren unter Verwendung von Stahlfaserbeton-Tübbinggen realisiert. Einzelne Referenzobjekte werden nachfolgend kurz vorgestellt. CTRL (Channel tunnel rail link) ist der Verbindungstunnel zwischen London und Frankreich. Das Bauvorhaben wurde in den Jahren 2003 bis 2004 fertig gestellt. Insgesamt 200 000 Einzelsegmente wurden im temporären Fertigteilwerk zur Realisierung des Projektes hergestellt. Bei einem Innendurchmesser von  $7,15 \text{ m}$  und einer Schalenstärke von  $350 \text{ mm}$  wurde ein Ring aus 9 Segmenten + Schlussstein zusammengestellt. Sehr hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit wurden im Rahmen der Ausschreibung dieses Projektes definiert. Dabei galt es ein widerstandsfähiges Material gegen aggressive Umweltbedingungen einzusetzen und eine Lebensdauer der Tunnelringe von 120 Jahren zu sichern. Der Stahlfaserbeton wurde mit Dramix Stahldrahtfasern RC-80/60-BN produziert. Im Vergleich zu üblichen Erfahrungswerten herkömmlich bewehrter Tübbinge war die Anzahl einzelner Segmente, die infolge Beschädigungen ausgewechselt beziehungsweise nachträglich saniert werden mussten, sehr klein. Der doppelspurige,  $3160 \text{ m}$  lange Oenzbergstunnel, wurde mit einer Herrenknecht Mix-Shield-TBM aufgefahren. Im Rahmen dieses Bauvorhabens wurden Versuche mit Hilfe modernster Einrichtungen durchgeführt, um das Verhalten der Tübbinge, insbesondere der Tübbingfugen, unter vor Ort herrschenden Belastungszuständen zu untersuchen. Dabei wurden folgende Bewehrungsarten miteinander verglichen:



9 TBM Herrenknecht Projekt STEP Abu Dhabi.

- reine Stahlfaserbewehrung,
  - kombinierte Bewehrung; Stahlfasern und Bewehrungsnetze,
  - konventionelle Bewehrung (Bewehrungsnetze, Stabbewehrung).
- Bild 8 verdeutlicht das duktile Materialverhalten von Stahlfaserbeton unter Druckbelastung. Zudem wurde das gleiche Lastniveau wie bei der Ausführungsalternative mit herkömmlicher Bewehrung erreicht.

Mit dem Bau einer Trinkwasserzuleitung aus dem Mangfalltal wurde in Deutschland ein  $17,50 \text{ km}$  langes Tunnelprojekt mit Tübbinggen aus reinem Stahlfaserbeton realisiert. Der *Hofoldingen Stollen* wurde in der Bauzeit 1999 bis 2004 ausgeführt. Der Tübbingring bestehend aus 6 Segmenten in einem Durchmesser von  $3,30 \text{ m}$  besitzt eine Schalenstärke von  $180 \text{ mm}$  und wurde mit  $40 \text{ kg/m}^3$  Dramix RC-65/60-BN ausgeführt. Durch Einsatz von Stahlfaserbeton wurde der Bauprozess deutlich beschleunigt. Die ansonsten geläufigen Problematiken hinsichtlich Kanten- und Eckabplatzungen an einzelnen Segmenten konnten zufriedenstellend eingeschränkt werden. Eines der jüngsten Grossprojekte mit Tübbingproduktion ist für das Tunnelprojekt STEP in Abu Dhabi 2010 angelaufen. Die Planung sieht einen insgesamt  $42 \text{ km}$  langen Abwassertunnel vor, der in drei «Lose» unterteilt ist. Das Los T-02 befindet sich in der Ausführungsphase, ist zirka  $15,6 \text{ km}$  lang und soll bereits im Sommer 2012 fertig gestellt sein (Bild 9). Vorgesehen ist eine zweischalige Ausführungsvariante (unbewehrte Innenschale als «final lining»). Die Tunnelröhren haben einen Durchmesser von  $6,30 \text{ m}$ ; die Elementstärke der einzelnen Tübbingelemente beträgt  $280 \text{ mm}$ . Aus betontechnologischer Sicht war die Zusammenstellung der Betonrezeptur eine wahre Herausforderung. Erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie erschwerte geologische Bedingungen hinsichtlich der Aggressivität

des anstehenden Grundwassers galt es zu begegnen. Eine Ausführungsvariante in Stahlfaserbeton wurde festgelegt, um die Dauerhaftigkeit zu verbessern und Abplatzneigungen zu minimieren, um etwaige Wasserwegigkeiten zu verhindern. Aufgrund sehr hoher Spaltzugkräfte an den Verbindungsstellen der einzelnen Segmente wurde entlang der Quertungen eine lokale Zusatzbewehrung bemessen. Die Bemessung der Stahlfaserbetontübbinge erfolgte ansonsten in Anlehnung an das DBV-Merkblatt [3]. Der massgebende Lastfall wurde im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt. Die erforderliche Nachrisszugfestigkeit gemäss Bestimmungen des DBV-Merkblatts von  $1,6 \text{ N/mm}^2$  wurde mit einem Stahlfasertyp Dramix RC-65/60-BN mittels Biegebalckenprüfungen bestätigt. ■

## Literatur

- [1] Bemessung von Stahlfaserbeton im Tunnelbau, B. Maidl, A. Nitschke, M. Ortu, Bochum, Juni 1999.
- [2] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton, Ausgabe März 2010.
- [3] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Version Oktober 2001.
- [4] EN 14651, Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit).
- [5] EN 14889-1, Fasern für den Beton – Teil 1, Stahlfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität.
- [6] JCI, Test for flexural strength and toughness for fibre reinforced concrete, JSCE SF-4 Japan Concrete Institute, 1984.
- [7] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik «Richtlinie Faserbeton» Fassung Juli 2008.
- [8] R. Suter, P. Buchs, Precast fibre reinforced tunnel lining segments, Experimental Study, Final Report, University of Applied Sciences, Fribourg, 2008.
- [9] SIA 162/6: 1999 Empfehlung Stahlfaserbeton.

\* Dipl.-Ing. Philipp Guirguis, Bekaert GmbH, Technischer Leiter Bauprodukte, D-61381 Friedrichsdorf; Hans Peyer, Bekaert (Schweiz) AG, Verkaufsleiter Bauprodukte, 5400 Baden